拾柒

農業淨零排放

一 國家尺度土壤有機碳儲潛力估算

許健輝、顏淳阡

土壤有機碳固存 (soil organic carbon sequestration, SOC) 為緩解氣候變遷的關鍵策略，瞭解土壤之碳固存能力和動態變化有助於確定實施固碳農業的重點區域。以礦物結合態土壤有機碳飽和度 (mineral–associated organic carbon saturation percentage, MAOCsat) 作為評估土壤性質本身對SOC固存能力的指標，以RothC模型模擬110–129年SOC變化率 (ΔSOC) 作為評估氣候及土地利用等綜合條件下土壤對SOC固存能力的指標。接著使用$MAOC_{sat}$和ΔSOC的中位數作為區分高低兩類的閾值，基於這兩個指標各兩個分級，建構4個SOC固存潛力等級，包括R1 (高$MAOC_{sat}$，低ΔSOC)、R2 (低$MAOC_{sat}$，低ΔSOC)、R3 (高$MAOC_{sat}$，高ΔSOC) 及R4 (低$MAOC_{sat}$，高ΔSOC)，用於SOC固存潛力的空間評估。R1表示此區土壤有機碳已趨於平衡，有機碳變化有限；R2 表示此區土壤有增匯的潛力，但可能受限於氣候條件及管理；R3表示此區為敏感區，容易受管理方式改變造成SOC下降；R4表示此區土壤仍具有增匯的潛力，若執行適當的農耕管理可有效提高有機碳增加速率，此區可視為增匯熱區。研究結果顯示，約29%的農地面積可被分類在增匯熱區 (R4)，該區中以旱田 (53%) 和水田 (29%) 占比最大；此外，敏感區 (R3) 主要分布在坡地區域，主要以果園為主。未來可依據該分區結果提供對應的增匯管理措施，以有效提高土壤碳匯。

二 高光譜感測技術於土壤有機碳量測之應用

柯弈瑄、林毓雯

為填補國家溫室氣體排放清冊缺口，並因應未來配合氣候變遷因應法「自願減量」辦法上路後可能產生的大量土壤碳量測需求，建立1套快速、準確的土壤有機碳量測方法實為當務之急。運用光譜感測技術，開發適用於臺灣土壤的土壤有機碳量

DOI: 10.29572/TARIAR.202603_114.0017

測模型。蒐集來自全臺北、中、南、東及離島等地2,177筆土壤樣本，收集其600–1,700 nm的高光譜波段資料，從影像中選取感興趣區域 (Region of Interest, ROI)，取其光譜平均值、變異數和Savitzky–Golay導數作為特徵值，經過特徵轉換與主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 降維處理後，結合土壤有機質實測數據進行建模。將各大土類樣本訓練集與測試集比例固定為2.5：1，分別以支援向量機 (Support Vector Machine, SVM)、隨機森林回歸 (Random Forest Regression, RF) 及深度神經網路 (Deep Neural Network, DNN) 方法訓練回歸模型，結果顯示DNN模型預測表現最佳 (圖17–1)，測試集實測值與預測值的關係圖決定係數 (R^2) 可達0.86。至於擴增外部測試樣品，並檢視模型於不同土壤條件與場域下的穩定度與可靠性，以評估模型適用性，仍待進一步驗證，後續可作為推動專案尺度土壤有機碳量測與應用之重要參考。

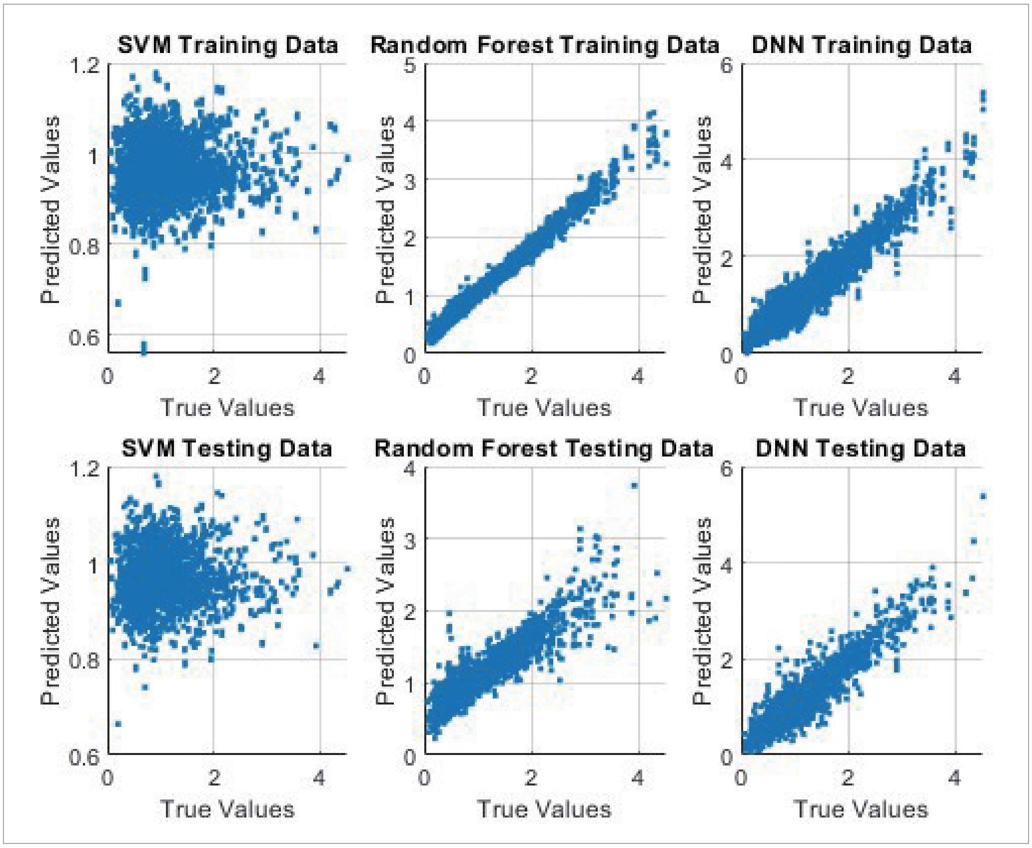

圖17–1. 設定各大土類之訓練/測試樣本比為2.5所建立的支援向量機 (左)、隨機森林回歸 (中) 及深度神經網路 (右) 模型之土壤有機碳預測結果 (波段：600–1,700 nm，n = 2,177)

三 RothC模型應用於水旱輪作模式下土壤碳匯預測評估

柯弈瑄、陳柱中

Rothamsted Carbon Model (RothC) 模型是全球最廣為使用的土壤碳匯預測模型之一，但該模型主要發展於溫帶旱田環境，用於水田環境中容易錯估土壤有機碳含量，需進行參數校正，使其適用於水田土壤或其他非原始模型預設下的土壤環境。為評估 RothC 模型在水旱輪作模式下的應用與預測能力，並探討不同肥培管理方式對土壤碳匯動態變化的影響。透過調整RothC模型中水田操作條件下4個活性碳庫的分解速率，並修正模型的水分逆境調整機制。結果顯示，調整後的模型在堆肥處理及綠肥處理模擬表現較佳，能較準確地反映實測土壤有機碳變化，但在化肥處理及泥炭處理預測值與實測值仍有差異 (圖17–2)，尚需進一步研析模型參數。透過提供水旱輪作模式下土壤碳匯模型的應用方法，有助於更準確地預測不同農耕管理情境的土壤有機碳變化，並為土壤碳匯管理策略提供科學依據。未來將持續蒐集不同管理方式的農耕資料及土壤有機碳數據，以評估模型應用於臺灣農耕系統碳匯預測的適用性。

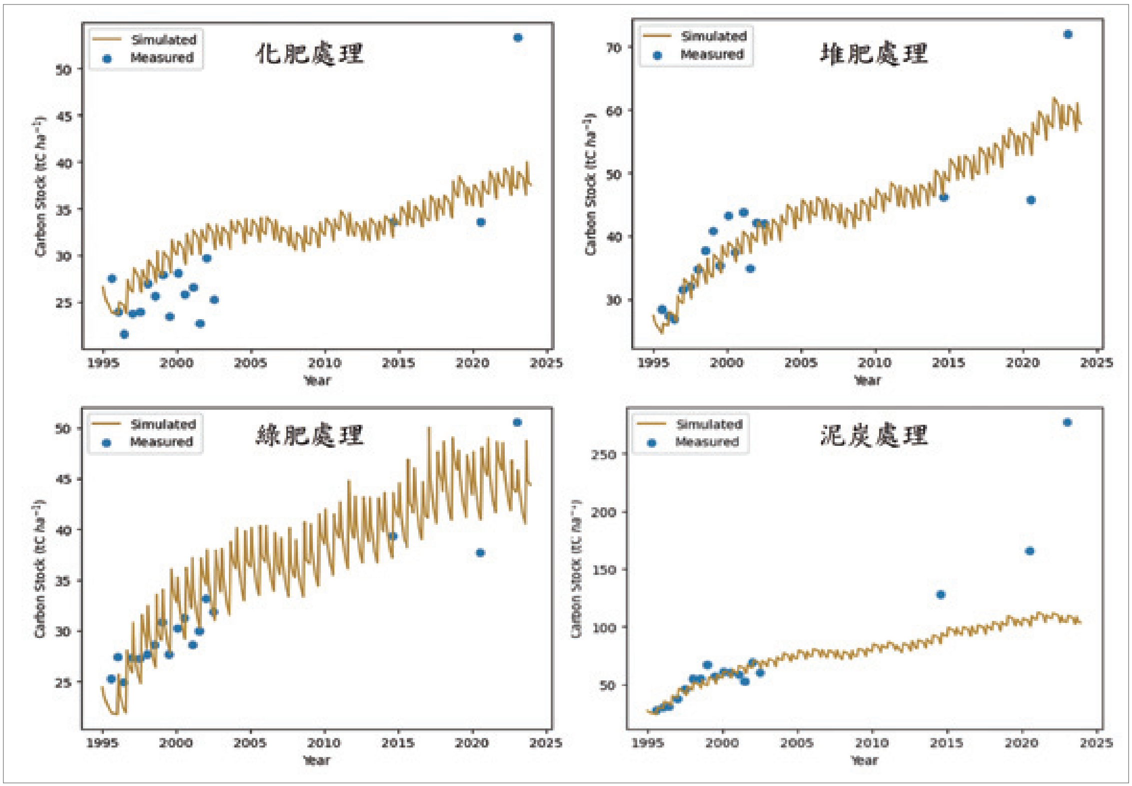

圖17–2. 調整後RothC模型對水旱輪作模式下化肥、堆肥、綠肥及泥炭處理的土壤有機碳變化模擬結果

四 落花生氧化亞氮本土排放係數初探

陳柱中

氧化亞氮 (N_2O) 是主要的農業溫室氣體，目前農業部門的氧化亞氮排放量估算是以排放係數乘上氮投入量計算，但我國尚缺乏本土旱作氧化亞氮排放實測數據，目前僅能援引IPCC的預設值 (0.01) 計算之。為探討臺灣主要的旱作作物–落花生，監測不同施氮處理下氧化亞氮排放量，透過氮投入量與氧化亞氮排放量之相關性建立排放係數。試驗地點位於本所 (臺中霧峰)、雲林麥寮、雲林土庫，進行不同氮肥施用量 (0–120 kg N ha^{-1}) 處理，每處理3重複。試驗期間採用密閉罩法，以氧化亞氮氣體分析儀或氣相層析儀量測不同時間點之氣體濃度，再計算為通量。結果顯示，全生育期氧化亞氮累積通量與氮投入量呈現高度正相關的線性關係 ($R^2 > 0.83$)，其斜率 (即排放係數) 介於0.002至0.017之間 (表17–1)。

五 畜牧糞尿水循環利用減碳效益分析

陳琦玲、施雅惠

根據農業部113年調查統計，臺灣豬隻在養頭數約521萬頭，依每日每頭豬約產生25公升糞尿水估算，每年每頭豬約產生4,686公噸豬糞尿水。以芳苑鄉聯宇生物有限公司建立之「海濱循環園區水資源中心」為對象，進行資源再利用、環境安全性與減碳效益分析。水資源中心處理來自4家養豬畜牧場、共計4,450頭豬隻糞尿水，年處理量為32,485公噸。經固液分離與厭氧發酵處理後，33%沼液回歸農地作為肥分 (施灌面積16.55公頃)；57%再經好氣處理後作為植物澆灌水 (澆灌面積10.3公頃)；剩餘10%依規定放流至地面水體。經環境安全性分析，其再利用過程符合環境標準。在減碳效益方面 (圖17–3)，案場的淨排放量為83.3 tCO_2e，雖尚未達到淨零，但相較於原處理方式，其淨減排量為262.85 tCO_2e。此效益

表17–1. 各試驗期作落花生氧化亞氮期作累積通量與氮投入量之相關性

年度–期作	試驗區域	氮投入量 (kg N ha^{-1})	氧化亞氮與氮投入量關係式[1]	R^2
2023–2	雲林土庫細質地	0, 40, 80	$y = 0.011\ x + 0.0004$	0.980
2023–2	雲林土庫粗質地	0, 40, 80	$y = 0.0173\ x + 0.1008$	0.999
2024–1	雲林麥寮	0, 40, 80	$y = 0.0127\ x + 1.16$	0.922
2024–2	雲林麥寮	0, 40, 80, 120	$y = 0.0083\ x + 0.6701$	0.965
2023–1	臺中霧峰	0, 40, 80	$y = 0.0022\ x + 0.3058$	0.891
2024–1	臺中霧峰	0, 40, 80	$y = 0.016\ x + 0.4939$	0.832
2025–1	臺中霧峰	0, 40, 80, 120	$y = 0.0091\ x + 0.2461$	0.989

[1]x值為氮投入量 (kg N ha^{-1})，y值為氧化亞氮累積通量 (kg N_2O–N ha^{-1})

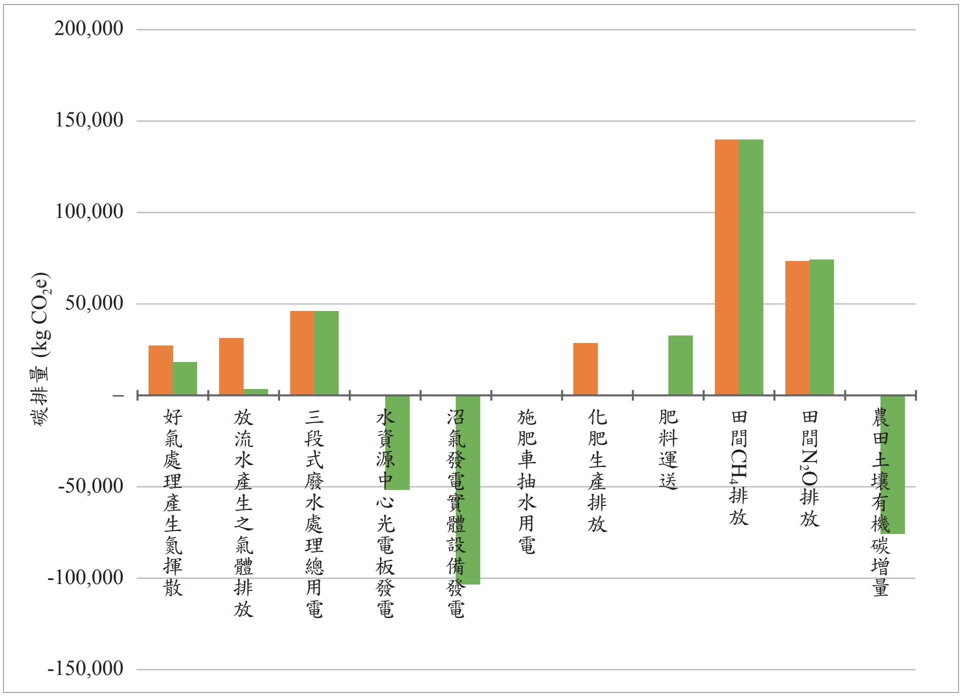

圖17–3. 芳苑海濱循環園區畜牧糞尿水循環利用模式之溫室氣體排放量與減碳效益比較

主要源於：1.光電系統與沼氣發電產生的綠電；2.沼液施灌增加土壤有機碳含量；及3.沼液替代化學肥料所減少的排放。研究結果證明，此畜牧糞尿水循環利用模式不僅能解決畜牧糞尿水去化問題，更能為畜牧場帶來顯著的減碳貢獻。

六 水田管理與操作之減排效益

(一) 水分管理

侯雅玲

為評估水位管理對連作水田溫室氣體–甲烷及氧化亞氮排放減量的綜合影響，參試品種為水稻'台南11號'，以乾濕交替灌溉 (Alternative wetting and drying irrigation, AWD) 進行水位控制，在水稻成活期後開始進行AWD處理，除了曬田期、孕穗及抽穗期外，其他時間維持水位在–5至5 cm之管理方式，與對照組 (維持水位3–5 cm) 進行比較，每處理各重複4次。自1月6日至11月3日累積田間溫室氣體通量量測計80天次，與對照組相比：1. AWD減少甲烷排放65%，減排4.42 tCO_2e ha^{-1} yr^{-1}; 2. AWD增加氧化亞氮排放94%，增排0.1 tCO_2e ha^{-1} yr^{-1}。相較於對照組，AWD組可減少全球暖化潛勢 (Global warming potential, GWP) 37%，減排4.32 tCO_2e ha^{-1} yr^{-1}。在產量表現部分，AWD組與CK組之平均產量經統計分析，兩期作之產量表現未達顯著差異。僅一期作之有效穗

數有顯著差異，CK組較AWD組之有效穗數多4.5支。AWD水分管理全年可降低3成以上之GWP，並維持產量，水分管理仍多留意有效穗數的提升與維持，以達到穩產的效果。

(二) 稻草移除及肥料類型

林毓雯、柯弈瑄

為評估氮肥形態和稻草移除對水田溫室氣體排放的影響，試驗於臺中市霧峰區進行，採複因子試驗，因子1為稻草移除與否，因子2為氮肥型態 (硝銨混合氮或銨態氮)，田區採裂區設計，每處理組合2重複。試驗結果顯示，以銨態氮取代硝銨混合態氮可降低一、二期作氧化亞氮排放，但增加二期作甲烷排放。累計整個栽培周年，以銨態氮取代硝銨混合態氮可降低溫室氣體排放1.47 $tCO_2e\ ha^{-1}\ yr^{-1}$，減排16.2%，且分別提高一期作與二期作氮肥農藝效益33.8%與33.0% (表17–2)。稻草移除可降低一、二期作甲烷排放，然亦造成一期作氧化亞氮排放增加 (表17–3)。累計整個栽培周年，稻草移除較稻草留田可降低水田溫室氣體排放5.34 $tCO_2e\ ha^{-1}\ yr^{-1}$，減排48.2%。

表17–2. 水稻不同氮肥形態處理之溫室氣體排放量、稻穀產量及氮肥農藝效益

			CH_4 ($kg\ ha^{-1}$)	N_2O ($kg\ ha^{-1}$)	GHG ($tCO_2e\ ha^{-1}$)	稻穀產量 (kg)	氮肥農藝效益 ($kg–grain\ kg\ N^{-1}$)
一期作	處理組	N180	85.2	0.79	2.59	8,659 ± 152	19.8
		N0	–	–	–	5,246 ± 494	–
	對照組	N132	89.1	4.91	3.80	8,249 ± 272	13.1
		N0	–	–	–	3,052 ± 611	–
二期作	處理組	N160	166	1.48	5.04	8,104 ± 576	10.3
		N0	–	–	–	6,463 ± 835	–
	對照組	N176	128	6.46	5.30	7,699 ± 720	6.9
		N0	–	–	–	6,491 ± 1,020	–

表17–3. 稻草留田與移除處理對溫室氣體排放量及稻穀產量影響

		CH_4 ($kg\ ha^{-1}$)	N_2O ($kg\ ha^{-1}$)	GHG ($tCO_2e\ ha^{-1}$)	稻穀產量 (kg)
一期作	稻草留田	135.0	2.42	4.43	8,581 ± 152
	稻草移除	39.2	3.43	2.01	8,216 ± 417
二期作	稻草留田	197.0	4.26	6.64	7,972 ± 628
	稻草移除	97.9	3.69	3.72	7,831 ± 742

七 西南沿海區大面積不整地玉米及大豆與直播水稻栽培之土壤增匯耕作制度落地應用

江志峯

為恢復西南沿海地區退化土地並提升鹽化土壤生產力，於彰化芳苑與大城、雲林四湖、臺南將軍、北門及學甲等地設置6個鹽化土壤驗證區 (每處總面積≥0.6公頃)，實施聯合國糧農組織 (FAO) 建議之8項土壤再固碳管理措施，進行土壤碳增匯效益查核。結果顯示，保育耕犁管理下20公頃硬質玉米田之平均產量為8,000 kg ha^{-1}，略低於慣行耕作之8,600 kg ha^{-1}，但氮的農藝利用效率達133 kg kg^{-1}，顯著高於慣行耕作的43 kg kg^{-1}。0–60 cm土層碳儲量平均為37.2 t C ha^{-1}，較慣行耕犁之35.6 t C ha^{-1}增加1.6 t C ha^{-1}，約相當於增匯5.9 t C ha^{-1}。此外，應用硫磺、石膏及酸性資材改良和配合不同一期作覆蓋作物栽培組合技術，顯示可有效提升鹽化土壤碳存量與作物生產潛力。臺南北門36公頃鹽化土壤改良後，秋作硬質玉米苗立率超過90%，產量由1,000 kg ha^{-1}逐步提升，顯示土壤生產力已顯著恢復，為推動低生產力鹽化土壤再生利用提供技術依據與實證基礎。

八 酸性土壤施用生物炭對土壤肥力、碳儲量及水稻產量影響研究

林毓雯、柯奕瑄、黃敬儒

為評估生物炭施用對酸性土壤肥力及水稻產量之影響，於本所試驗田進行生物炭深埋處理，開挖1公尺深，設定3個生物炭施用變量，逐層填入稻殼炭後覆土與地面等高，另於苗栗通霄與臺中清水試驗區則以生物炭表層撒施後翻犁入土處理，各試驗田起始年份及生物炭處理詳表17–4。試驗結果顯示，生物炭表土混施可顯著提高土壤pH及有機碳 (OC)、交換性鉀、交換性鈣、交換性鎂濃度，深埋則對表土性質影響較小 (表17–5)。施用1年後稻殼炭深埋較表土混施可提高碳在土壤中的殘留率，深埋處理碳殘留率為82.0–102.0%，表土混施處理則殘留率則僅27.9% (表17–6)。調查臺中清水試驗田一期作稻穀產量，結果顯示，稻穀產量 (水分13.5%) 隨生物炭施用量增加而增加，0%、0.8%、1.6%生物炭處理之稻穀產量分別為7,083、7,271、7,595 kg ha^{-1} (表17–7)。

表17–4. 各試驗田試驗處理及生物炭基本性質

		起始年	生物炭種類	施用量 Mg ha^{-1}	水分含量 %	有機碳 %	施用方法
本所	2T	113	稻殼炭	71	5.94	44.8	深埋
	5T	113	稻殼炭	179	5.94	44.8	深埋
	10T	113	稻殼炭	357	5.94	44.8	深埋
通霄		113	稻殼炭	75	5.94	44.8	與表土混合
清水	0.8%	114	雜木炭	21	30.0	65.3	與表土混合
	1.6%	114	雜木炭	42	30.0	65.3	與表土混合

表17–5. 本所及通霄試驗田各生物炭處理試驗前後0–15 cm土壤肥力

		pH[z]	EC µS cm^{-1}	OC %	有效性氮 (mg kg^{-1})	有效性磷	交換性鉀
本所	112年11月	6.21 ± 0.21	45.0 ± 8.9	0.59 ± 0.04	15.7 ± 5.6	22.1 ± 7.1	50.1 ± 6.3
	113年11月 2T	6.08 ± 0.21[y]	35.8 ± 6.2	0.62 ± 0.04	10.4 ± 2.0 a	30.4 ± 6.2	89.0 ± 36.1
	113年11月 5T	6.25 ± 0.16	36.3 ± 8.7	0.59 ± 0.07	9.3 ± 7.0 ab	29.2 ± 1.8	126.0 ± 9.5
	113年11月 10T	6.29 ± 0.02	29.3 ± 3.0	0.57 ± 0.04	2.8 ± 0.8 b	26.8 ± 3.4	79.5 ± 34.1
通霄	112年11月	4.74 ± 0.18 a	41.7 ± 9.1	0.65 ± 0.10 a	5.04 ± 1.72	90.6 ± 7.0	65.0 ± 12.5 a
	113年11月	5.60 ± 0.20 b	39.6 ± 6.7	1.22 ± 0.08 b	9.66 ± 2.53	98.2 ± 13.9	247.0 ± 48 b

[z] 分析方法如下：pH (土水比1：1)；EC (土水比1：5)；OC (乾燒法)；有效性氮 (2M KCl萃取)；有效性磷 (Bray no.1)；交換性鉀 (1M醋酸銨，pH7)

[y] 113年調查同一欄之表土或底土數據未標註英文字母或標註相同字母者表示差異未達顯著水準 ($P > 0.05$)

表17–6. 生物炭處理1年後碳殘留比例計算

		生物炭施用量 kg ha^{-1}	水分 %	OC %	施碳量 kg ha^{-1}	113年碳儲量 kg ha^{-1}	殘留率 %
農試所	低量處理	67.2	5.9	44.9	30.2	52.7	-
	中量處理	168.0	5.9	44.9	75.4	131.7	102.0
	高量處理	336.0	5.9	44.9	151.0	263.5	82.0
通霄		75.0	5.9	44.9	31.7	8.85	27.9

九 農場溫室氣體排放監測

杜昆育、吳秉諭

國家排放清冊113年提及水稻甲烷排放係數多屬14年前之數據，爰此更新及建立本土溫室氣體排放係數，以提供政策或國家溫室氣體排放清冊參考。4月8日至10月16日於嘉義分所溪口農場，以氣體分析儀 (FACE–EB3200) 與密閉罩法，對不同耕作制度田區 (E1：水稻－水稻、E6：水稻－玉米)、不同氮肥施用量等級 (L、S、M、H)，總計布24個採樣點。以平均空氣背景值為基準推算全期作甲烷 (CH_4)、氧化亞氮 (N_2O) 每日通量變化結果 (圖17–4、17–5)。甲烷排放峰值發生於一期作水稻收穫後休耕期，推測與休耕期降雨與田間稻稈殘存導致，另二期作水稻1、2追肥湛水期出現峰值，秋作旱田則無甲烷峰值。氧化亞氮排放峰值發生於一期作水稻收穫前、一期作水稻休耕後；二期作水稻1、2追肥後出現峰值，秋作旱田部分則於追肥前後出現峰值，推測與施肥及田區無連續湛水有關。

表17–7. 清水試驗田不同生物炭用量下之一期作稻穀產量

		生物炭用量 Mg ha^{-1}	稻穀產量 kg ha^{-1}
清水	0%	0	7,083
	0.8%	21	7,271
	1.6%	42	7,595

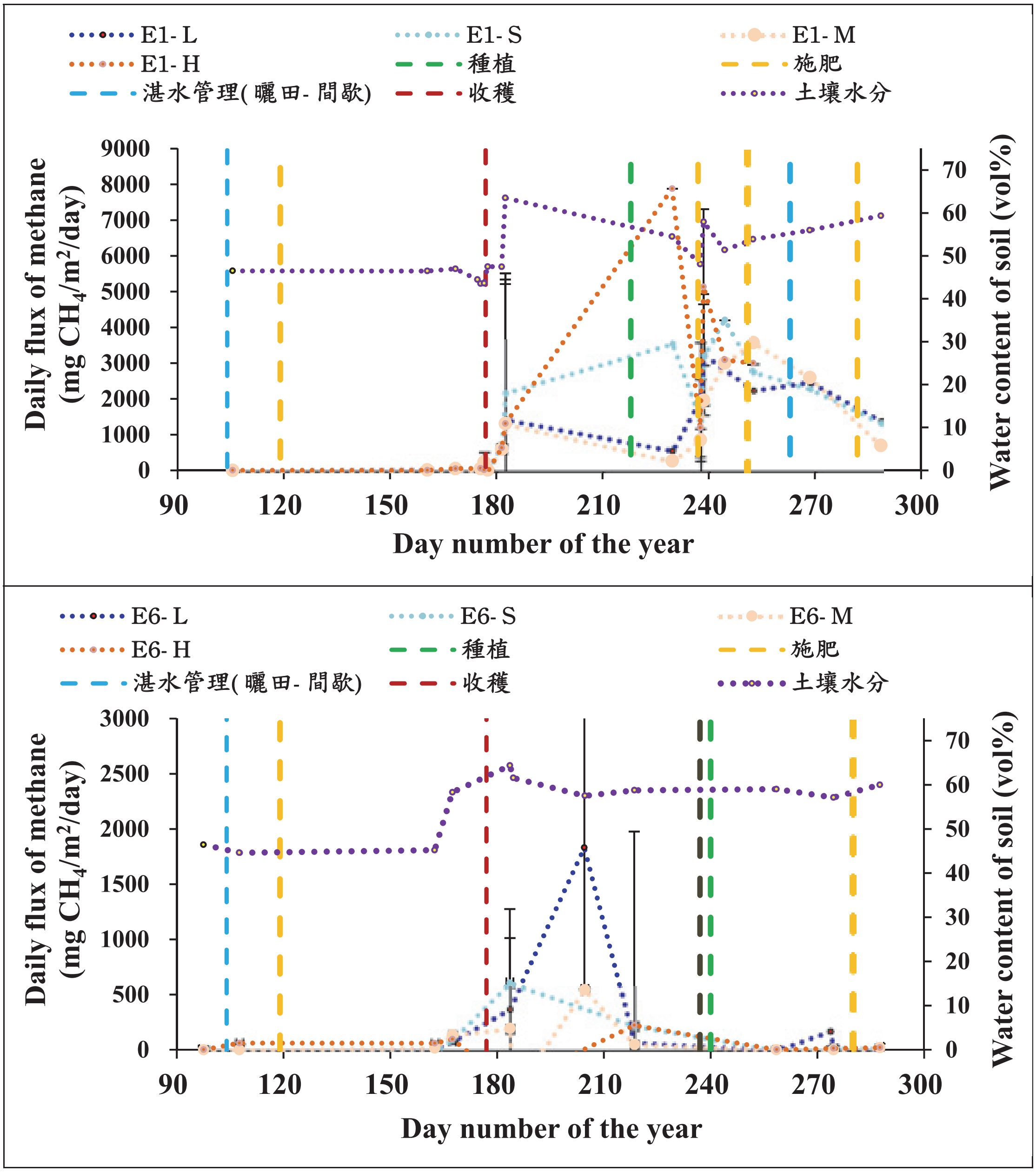

圖17–4. 嘉義分所溪口農場於114/4/8–114/10/16甲烷每日通量趨勢變化圖 (E1為水稻ー水稻、E6為水稻ー玉米；L、S、M、H表一期作施氮0、90、180、270 kg N ha^{-1}；二期作0、80、160、240 kg N ha^{-1})

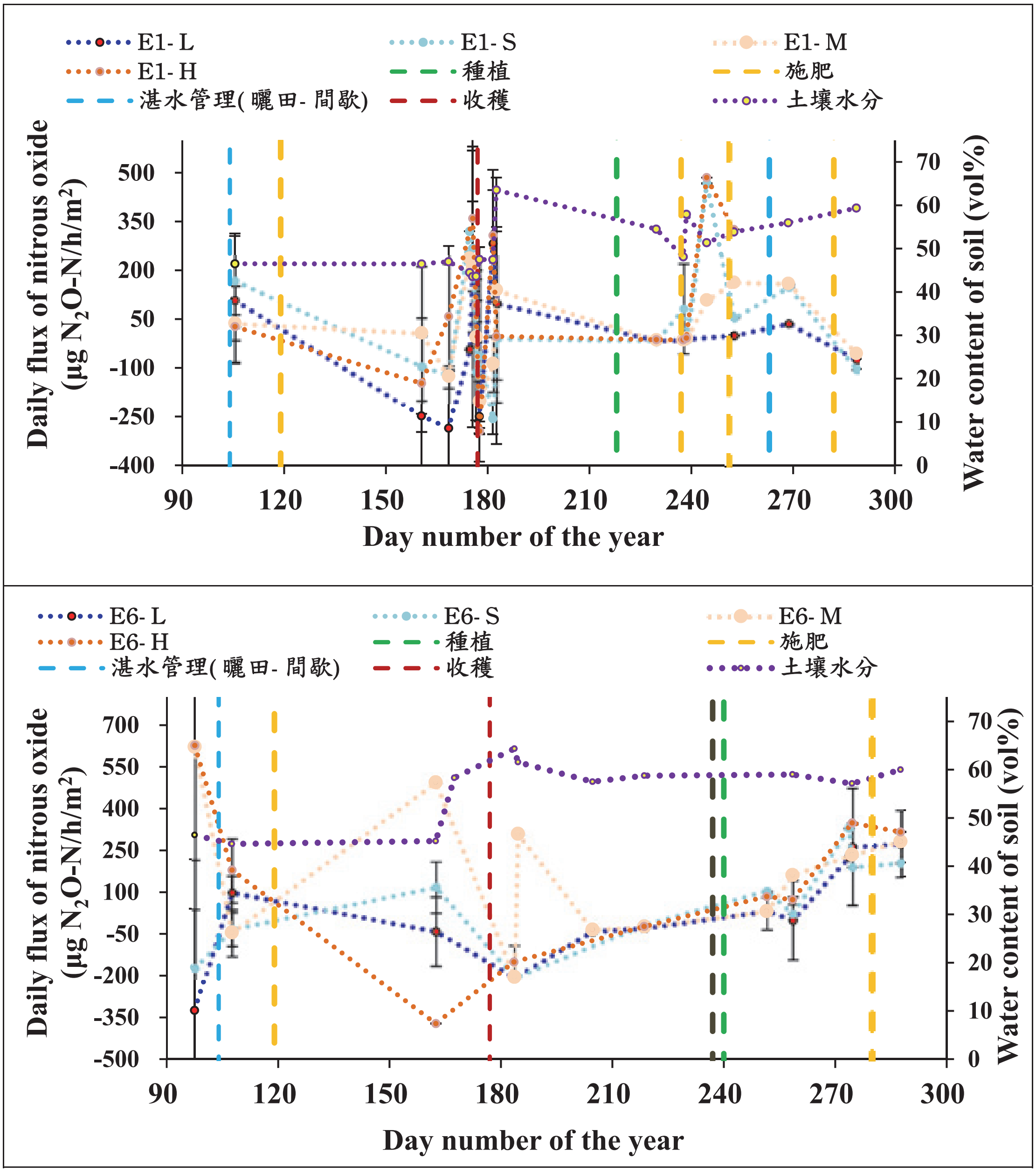

圖17–5. 嘉義分所溪口農場於114/4/8–114/10/16氧化亞氮每日通量趨勢變化圖 (E1為水稻一水稻、E6為水稻一玉米；L、S、M、H表一期作施氮0、90、180、270 kg N ha^{-1}；二期作0、80、160、240 kg N ha^{-1})